

УДК 621.374.33

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РАДИОИМПУЛЬСНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРОБОСКОПИЧЕСКОЙ ОЦИФРОВКИ

К. А. Бойков

Московский технологический университет (МИРЭА),  
119454, Москва, просп. Вернадского, 78

Статья поступила в редакцию 13 марта 2018 г.

**Аннотация.** Показаны основные этапы разработки и проектирования схемы электрической принципиальной системы радиоимпульсной регенерации для высокоскоростной стробоскопической оцифровки, позволяющей восстановить и воспроизвести одиночный сверхкороткий радиоимпульс нестационарной конфигурации в задачах радиовидения. Сформулировано обоснование выбора электронной компонентной базы, приведен расчет основных блоков и узлов системы. Построена схмотехническая PSpice-модель системы в среде Proteus. Исследована устойчивость циклогенеративного усилителя. Рассмотрен пример регенерации сложного одиночного сверхкороткого радиоимпульса без несущего частотного заполнения, полученного в результате отражения зондирующего сигнала от идеально проводящей сферы. Выполнен корреляционный анализ исходного и восстановленного импульсов, посредством модели строб-фрейм-дискретизатора в графической среде имитационного моделирования Simulink. Указаны основные недостатки системы и предложены пути их устранения.

**Ключевые слова:** сверхкороткоимпульсный сигнал, циклогенеративная система, масштабно-временное преобразование, строб-фрейм-дискретизация, радиовидение.

**Abstract.** Stroboscopic reception eliminates the possibility to process non-stationary ultrashort pulses, since a series of absolutely identical pulses is needed to correctly restore the original time profile. Reconstruction of the non-stationary ultrashort pulse signal from one pulse will solve the concealment problems in the systems of the radio

vision, and will also allow to restore the reflection from the object that is rapidly changing its position in space.

One of the methods for restoring and reproducing a complex single ultrashort pulse can be considered the use of a radio-pulse regeneration system (a cyclo-system). To confirm the functioning of this system, its hardware implementation is necessary. For a detailed demonstration of the basic principles of the operation of the radio-impulse regeneration system, it is advisable to limit its operation in the frequency band 20-200 MHz with the processing of a SCI with a duration of 5-50 ns, since recording of shorter single pulses without the use of stroboscopic reception methods is very difficult.

The selection and calculation of the elemental base for constructing the electrical schematic diagram is determined by the basic elements of the cyclo-system of the system - a broadband amplifier and a high-speed turn-key.

Based on the main significant parameters, the amplifier of the company Analog Devises - AD8000 is offered as an amplifier, as a high-speed switch - the switch SPDT HMC197b (Analog Devises). Also in the scheme is used digital delay and control on high-speed inverters 74HC04 (Texas Instruments), analog delay line on coaxial cable RG-213 with a wave resistance of 50 Ohm, the length of which is calculated. The attenuator is selected as passive, with ohmic total impedance of the arms, calculated on the basis of the load capacity and the need to match the input and output of the video amplifier.

When the basic conditions for signal regeneration are fulfilled and the input and output of the amplifier of the cycling system are matched, the damped pulse is re-amplified through the time of the delay line and the cycle repeats.

A model of a radio-impulse regeneration system is constructed in a circuit simulation environment based on the models of electronic components adopted in PSpice, for example, Proteus of Labcenter Electronics. With the help of this model, one of the basic conditions for the functioning of the cyclogenetic system has been checked: the absence of an involuntary self-excitation of the amplifier of the system, that is, stability. For this purpose, the phase-frequency characteristic of the amplifier with

feedback and the amplitude-frequency characteristic of the amplifier without feedback in the entire frequency range of operation were constructed. After checking and confirming the stability of the amplifier with a phase and amplitude margin, the functioning of the developed system in the regeneration mode of a complex single radio pulse obtained by reflection from an ideally conducting sphere is shown.

Based on the generated pulses, the original signal is reconstructed using a sampler-frame sampler model in the Simulink simulation environment, followed by a correlation analysis of the original and reconstructed pulse.

The PSpice model of the radio pulse regeneration system confirmed its viability, as well as the possibility of restoring a complex non-stationary signal by a single pulse.

**Keywords:** ultrashort impulse signal, cyclogenerative system, scale-time transformation, strobe-frame-sampling, radioview.

Поиск новых методик и решений высокоскоростной оцифровки сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов ведется с середины прошлого века и основные направления исследований так или иначе связаны со стробоскопическим приемом и обработкой при помощи методов масштабно-временного преобразования (МВП) [1,2], строб-фрейм-дискретизации (СФД) [3] и т.д.

Современные системы радиовидения предполагают обработку принятого СКИ-сигнала посредством цифровой вычислительной техники: воспроизведение временного профиля радиоимпульса (радиолокационного портрета) зондируемого объекта и его сравнение с репером из базы данных «портретов» объектов для установления идентификации [4].

Однако широко применяемый на практике стробоскопический прием исключает возможность осуществлять обработку нестационарных СКИ, поскольку для корректного восстановления исходного временного профиля сигнала необходима серия абсолютно идентичных радиоимпульсов. Для радиолокации это означает активное зондирование цели «пачками» импульсов, что не всегда приемлемо и эффективно, поскольку:

- зондирование маневренного объекта увеличивает вероятность обнаружения зондирующего источника, делая локатор уязвимым к системам радиоэлектронного противодействия;

- отражение от объекта, стремительно меняющего свое положение в пространстве, будет искажено при очередной смене направления движения.

В связи с этим становится актуальной задача восстановления и воспроизведения принятого СКИ-сигнала за однократный прием.

### 1. Анализ и выбор электронной компонентной базы устройства циклогенерации

В работе [5] впервые рассмотрен метод такого восстановления и воспроизведения посредством использования циклогенеративной системы (рис. 1), основанный на вводе сигнала в замкнутый контур, с одновременной отдачей его энергетической части для дальнейшего стробоскопического преобразования.

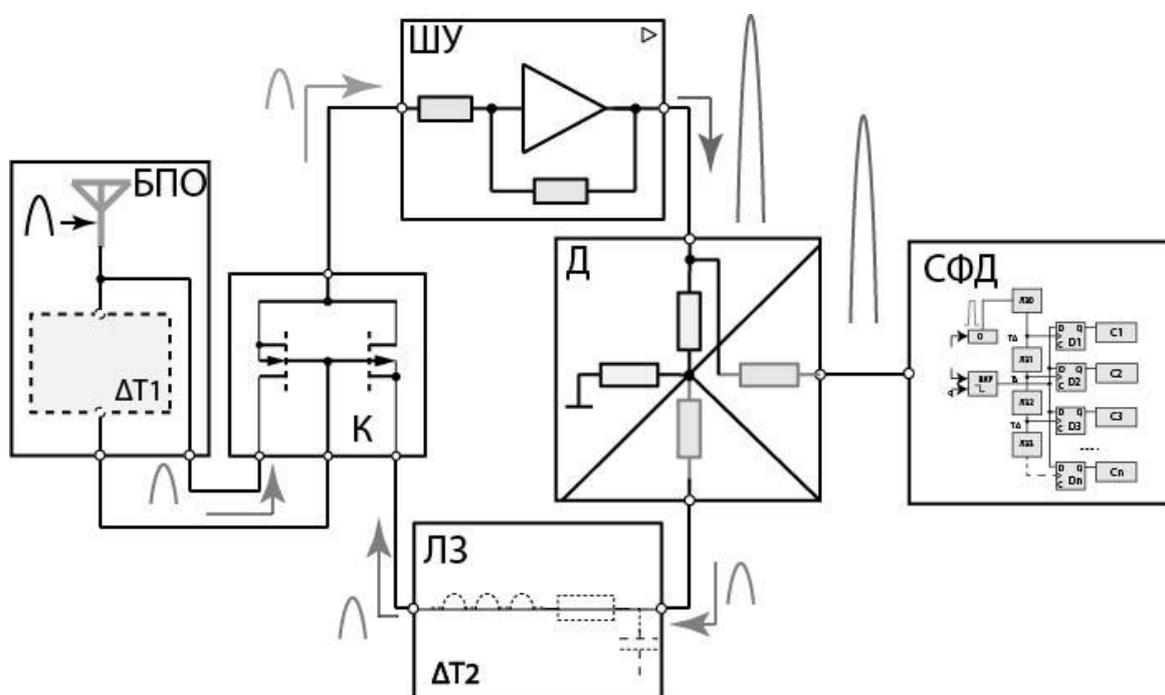


Рис.1. Структурная схема циклогенеративной системы на базе сверхбыстродействующей классической полупроводниковой электроники.

СКИ-сигнал, принятый блоком приема и обнаружения (БПО), приходит на широкополосный усилитель (ШУ) через открытое плечо сверхбыстродействующего перекидного ключа или коммутатора (К). По прошествии времени  $\Delta T1$ , соответствующему длительности СКИ, с БПО на вход управления К поступает высокоуровневый сигнал, переключающий плечи последнего. Усиленный ШУ СКИ, расщепляется делителем (Д) на две составляющих, одна из которых идет на строб-фрейм-дискретизатор (СФД), а вторая через линию задержки (ЛЗ) – для дальнейшего преобразования через переключенное плечо К на ШУ.

В работе [6] исследовано функционирование предложенной системы, построена ее идеальная модель при помощи блок-диаграмм в среде имитационного моделирования Simulink, а так же проведена корреляционная оценка воспроизводимости исходного радиоимпульса.

Результаты моделирования циклогенеративной системы, представленные в указанных выше работах, дают наглядное представление не только об основных принципах ее функционирования, но и о возможных проблемах циклогенерации, связанных с наличием радиотехнических факторов: шумов, нелинейных искажений, взаимных наводок.

Для проверки справедливости представленной модели, а также для подтверждения факта функционирования необходима аппаратная реализация разработанной системы радиоимпульсной регенерации. Следует заметить, что формирование СКИ длительностью  $100 \text{ пс} < \Delta T1 < 500 \text{ пс}$  может быть выполнено на коммерчески доступной электронной компонентной базе, например, генераторе GZ1118GN-01 компании Geozondas (Литва). Для детальной демонстрации основных принципов работы системы радиоимпульсной регенерации целесообразно ограничить ее функционирование в полосе частот 20...200 МГц с обработкой СКИ длительностью 5...50 нс, поскольку регистрация более коротких одиночных импульсов без использования стробоскопических методов приема весьма затруднена.

Выбор элементной базы для построения схемы электрической принципиальной необходимо начинать с основных элементов циклогенеративной системы – широкополосного усилителя и быстродействующего перекидного ключа. Именно от их характеристик зависит работа всей системы в целом.

Опираясь на основные параметры системы (коэффициент шума, коэффициент нелинейных искажений), в качестве ШУ удобно выбрать видеоусилитель компании Analog Devises – AD8000, выполненный по технологии «eXtra Fast Complementary Bipolar», позволяющей достичь ширины полосы 1,5 ГГц и скорости нарастания 4,3 В/нс. Кроме того, амплитудно-частотная характеристика данного усилителя имеет малую неравномерность на частотах до 190 МГц [7].

В качестве быстродействующего ключа можно рассмотреть коммутатор SPDT – HMC197b (Analog Devises), управляющий сигналами на частотах от 0 до 3 ГГц с потерями менее 1 дБ [8].

Для переключения плеч данного коммутатора необходимо два управляющих потенциала, инвертированных относительно друг друга (рис. 2).

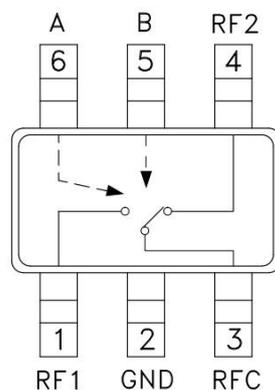


Рис. 2. Цоколевка коммутатора HMC197b.

При высоком уровне управляющего сигнала на входе «А» и низком уровне управляющего сигнала на входе «В» подключено плечо RFC-RFC2, при обратном включении управляющих входов подключено плечо RFC-RFC1.

Длительность задержки сигнала управления в БПО (рис. 1) должна быть не меньше длительности принятого СКИ  $\Delta T1$ . С учетом вышесказанного, для

управления ключом НМС197b возможно выбрать быстродействующие инверторы 74НС04 (Texas Instruments), с зависимым от напряжения питания временем переключения 7...75 нс [9].

Линия задержки может быть построена на коаксиальном кабеле Coaxial RG-213, предназначенном для передачи сигналов широкой полосы частот без искажений, с волновым сопротивлением 50 Ом, коэффициентом укорочения 0,8 и с затуханием менее 0,1 дБ/м [10].

Длина линии задержки зависит от типа выбранного кабеля и определяется исходя из необходимой длительности задержки:

$$L_{ЛЗ} \approx c \cdot g \cdot \Delta T2, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $g$  – коэффициент укорочения (показывает во сколько раз фазовая скорость распространения сигналов в линии меньше скорости света в свободном пространстве),  $\Delta T2$  – длительность задержки (определяется суммой времени переключения инверторов и времени переключения коммутатора).

Исходя из выражения (1) для СКИ максимальной длительностью  $\Delta T1 = 50$  нс и временем полного переключения коммутатора 10 нс, минимально возможная длина линии задержки:

$$L_{ЛЗ} \approx c \cdot g \cdot \Delta T2 = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,8 \cdot (10 + 50) \cdot 10^{-9} = 14,4 \text{ м.}$$

Аттенюатор (делитель) выбран пассивный, с омическим суммарным сопротивлением плеч, рассчитанным исходя из нагрузочной способности и необходимости согласования входа и выхода видео-усилителя. Расчет номиналов аттенюатора возможно выполнить лишь после построения схемы в целом.

Следует заметить, что при построении системы радиоимпульсной регенерации очередность следования аттенюатора и линии задержки для минимизации влияния паразитных параметров ЛЗ на аттенюатор, должна быть именно такой, как показано на рис. 1. Однако в условиях работы с линией длиной  $L_{ЛЗ} = 14,4$  м, для уменьшения влияния электромагнитных наводок, в

качестве допущения, возможно расположение ЛЗ до аттенюатора с последующим делением сигнала.

Прежде чем перейти от структурной схемы, представленной на рис. 1, к схеме электрической принципиальной так же надо учитывать, что подключенные к выходу циклогенеративной системы приборы дальнейшего анализа (нагрузка) будут влиять на внутренние параметры системы, что недопустимо. Для устранения данного влияния необходимо использование буферного усилителя, также выполненного на видео-усилителе AD8000.

## 2. Расчет радиотехнических параметров и разработка схемы электрической принципиальной устройства циклогенерации

После выбора всех компонентов можно построить схему электрическую принципиальную макета циклогенеративной системы на элементах быстродействующей полупроводниковой электроники (рис. 3).

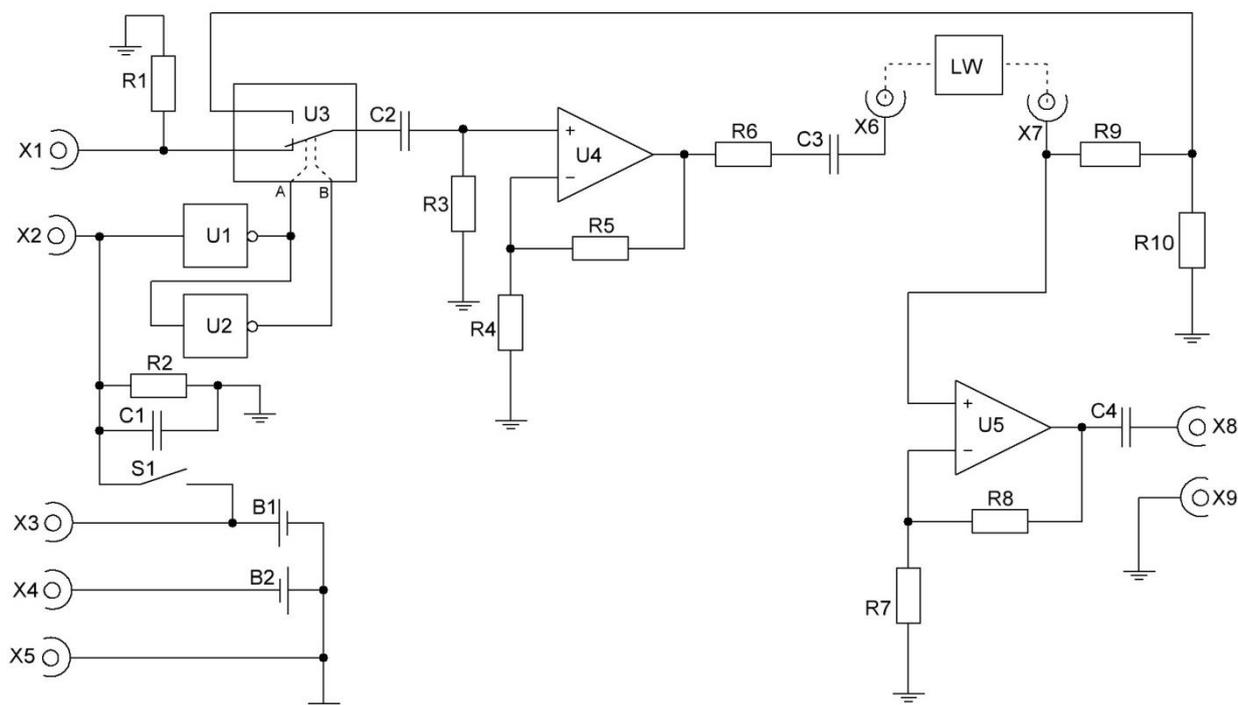


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная макета циклогенеративной системы на элементах быстродействующей полупроводниковой электроники.

Обратимся к принципу работы представленной схемы. При замыкании ключа  $S1$ , на вход  $X1$  приходит СКИ-сигнал (например, от управляемого

генератора), одновременно с этим на вход  $X2$  подается сигнал управления ключом  $U3$ , проходящий через цифровую линию задержки и управления  $U1-U2$ . Далее СКИ проходит через усилитель  $U4$  (коэффициент усиления определяется отношением номиналов резисторов  $R5$  к  $R4$ ) и задерживается линией  $LW$ , на время  $\Delta T2$ . Затем – на аттенюатор, сформированный элементами  $R9$  и  $R10$ , а от него параллельно на:

– дальнейшее стробоскопическое преобразование через буферный усилитель  $U5$  (коэффициент усиления определяется отношением номиналов резисторов  $R8$  к  $R7$ ) на выход  $X8$ ;

– на вход усилителя  $U4$  посредством положительной обратной связи, через переключенное плечо  $U3$ .

Таким образом, затухающий СКИ-сигнал повторно усиливается через время задержки линии  $LW$  и цикл повторяется.

Очевидно, что для реализации устойчивой генерации при согласовании входа и выхода  $U4$  необходимо соблюдение условий:

$$\begin{cases} \frac{R5}{R4} \approx \frac{R9}{R10}, \\ X_{ВЫХ} \approx R_B, \\ X_{ВХ} \approx R_B, \\ R_B = 50 \text{ Ом}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $R_B$  – волновое сопротивление линии задержки,  $X_{ВЫХ}$  – импеданс согласования выхода  $U4$ ,  $X_{ВХ}$  – импеданс согласования входа  $U4$ .

$X_{ВЫХ} = R_{ВЫХU4} + R6 + \frac{1}{j\omega C3}$ , где  $R_{ВЫХU4}$  – выходное сопротивление усилителя

$U4$ . При условии, что  $R_{ВЫХU4} + \frac{1}{j\omega C3} \ll R6$ , импеданс согласования выхода  $U4$  определяется согласующим резистором  $R6$ .

Также нетрудно показать, что импеданс согласования входа  $U4$  определяется суммой номиналов плеч аттенюатора  $R9$  и  $R10$ . Тогда выражение (2) переписывается как:

$$\begin{cases} \frac{R5}{R4} \approx \frac{R9}{R10}, \\ R6 \approx R_B, \\ R9 + R10 \approx R_B, \\ R_B = 50 \text{ Ом.} \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, из выражения (3) можно рассчитать номиналы плеч аттенюатора и параметры обратной связи  $U4$ :  $R9 = 30 \text{ Ом}$ ,  $R10 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R4 = 200 \text{ Ом}$ ,  $R5 = 300 \text{ Ом}$ ,  $R6 = 50 \text{ Ом}$ .

Цепочка  $C1-R2$  устраняет дребезг контактов тумблера  $S1$ . Постоянная времени данной цепочки не имеет практического значения, поскольку СКИ-сигнал и сигнал управления поступают в цепь одновременно:  $C1 = 10 \text{ нФ}$ ,  $R2 = 1 \text{ кОм}$ .

Резистор  $R1$  выполняет функцию согласования входа коммутатора с выходом генератора:  $R1 = R_B = 50 \text{ Ом}$ .

Конденсаторы  $C2$ ,  $C3$ ,  $C4$  выполняют разделительную функцию и не должны влиять на параметры схемы в выбранной полосе частот, т.е.

$$\frac{1}{j\omega C} \ll R6: C2 = C3 = C4 = 100 \text{ нФ.}$$

Резистор  $R3$  выполняет функцию смещения входа усилителя  $U4$  и может быть выбран в широком диапазоне номиналов от сотен ом до десятков кОм:  $R3 = 10 \text{ кОм}$ .

Номиналы резисторов обратной связи буферного усилителя  $U5$ , задающие его коэффициент усиления, выбираются исходя из потребления последующей нагрузки. Обратную связь для буферного усилителя  $U5$  целесообразно задать, как и для основного  $U4$ :  $R8 = 300 \text{ Ом}$ ,  $R7 = 200 \text{ Ом}$ .

Питание схемы двуполярное, выполнено на двух Li-Ion аккумуляторах  $B1$  и  $B2$ , подключенных к схеме через разъемы  $X3$  и  $X4$ .

### 3. Моделирование и исследование параметров системы циклогенерации

По окончании расчета всех компонентов необходимо построить модель системы радиоимпульсной регенерации в среде схемотехнического

моделирования, базирующейся на основе моделей электронных компонентов, принятых в PSpice, например, Proteus компании Labcenter Electronics (рисунок 4).

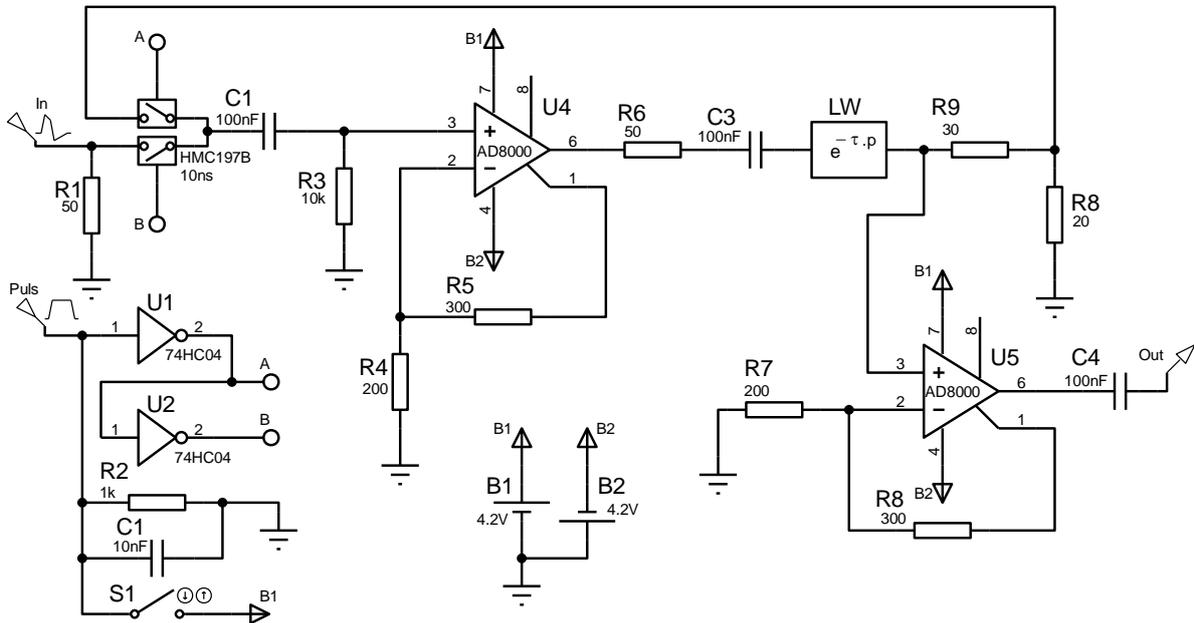


Рис. 4. Модель макета системы радиоимпульсной регенерации на элементах быстродействующей полупроводниковой электроники среде Proteus (*Puls* – запускающий импульс от тумблера *S1*, *In* – вход поступления одиночного СКИ сигнала, *Out* – выход системы).

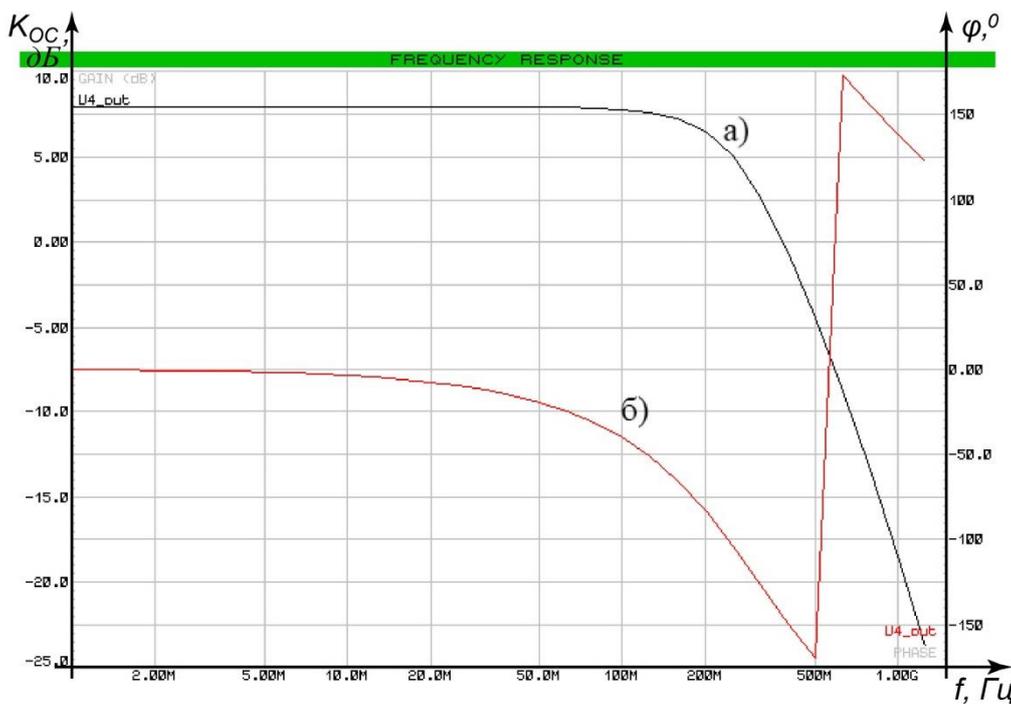


Рис. 5. АЧХ (а) и ФЧХ (б) циклогенеративного усилителя *U4*.

Проверка функционирования разработанной системы на моделях реальных компонентов, невозможна без оценки устойчивости циклогенеративного усилителя к самовозбуждению, поскольку условие отсутствия произвольной генерации является одним из основных при проектировании данной системы.

Для исследования устойчивости рассматривается прохождение сигнала по участку (усилитель – цепь обратной связи), строятся амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная характеристики (ФЧХ) усилителя с обратной связью во всем частотном диапазоне работы [11, 12] (рис. 5).

Усилитель устойчив, если в полосе частот, где  $|K \cdot \gamma| \geq 1$ , фазовый сдвиг  $\varphi < 180^\circ$ ,  $\gamma$  – коэффициент обратной связи,  $K$  – коэффициент усиления без обратной связи; либо если [11, 12]:

$$|K \cdot \gamma| < 1, \quad (4)$$

при  $\varphi \geq 180^\circ$  (инверсия фазы).

Коэффициент усиления с обратной связью  $K_{OC}$  в общем случае определяется как:

$$K_{OC} = \frac{K}{1 + \gamma \cdot K} \quad (5)$$

Поскольку обратная связь  $U4$  частотно независимая, то с учетом (5) выражение (4) можно переписать так:

$$\left| K_{OC} \cdot \frac{R4}{R5 + R4} \right| < \frac{1}{2} \quad (6)$$

Как видно из рис. 5 частота инверсии фазы  $f_{180} \approx 570$  МГц, на данной частоте  $K_{OC} = 0,41$ , следовательно, основное условие устойчивости (6) соблюдается во всем диапазоне рабочих частот. На верхней рабочей частоте  $f_B = 200$  МГц, усилитель устойчив с запасом по фазе более  $90^\circ$  и запасом по амплитуде более 10 дБ.

В качестве импульса для восстановления на рис. 6 представлен сигнал (размах  $U_M = 200$  мВ, длительность  $t = 50$  нс), отраженный от идеально проводящей сферы радиусом  $R = 20$  см. Численное моделирование

радиолокационного портрета сферы проведено в программной среде электродинамического моделирования FEKO 7.0 [13].

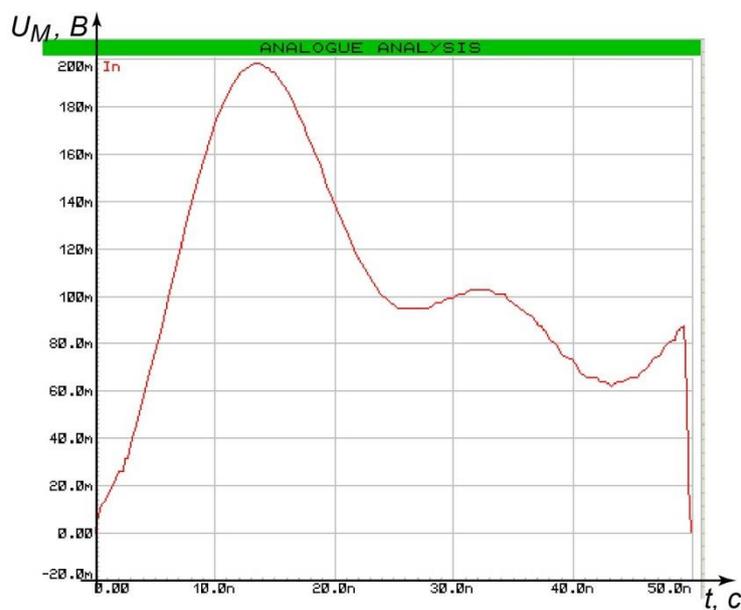


Рис. 6. Радиопортрет идеально проводящей сферы радиусом  $R = 20$  см.

После подтверждения устойчивости основного элемента разработанной системы, необходимо проверить ее способность к регенерации исходного радиоимпульса, то есть провести временной анализ (analogue analyses) работы схемы (рис. 7).

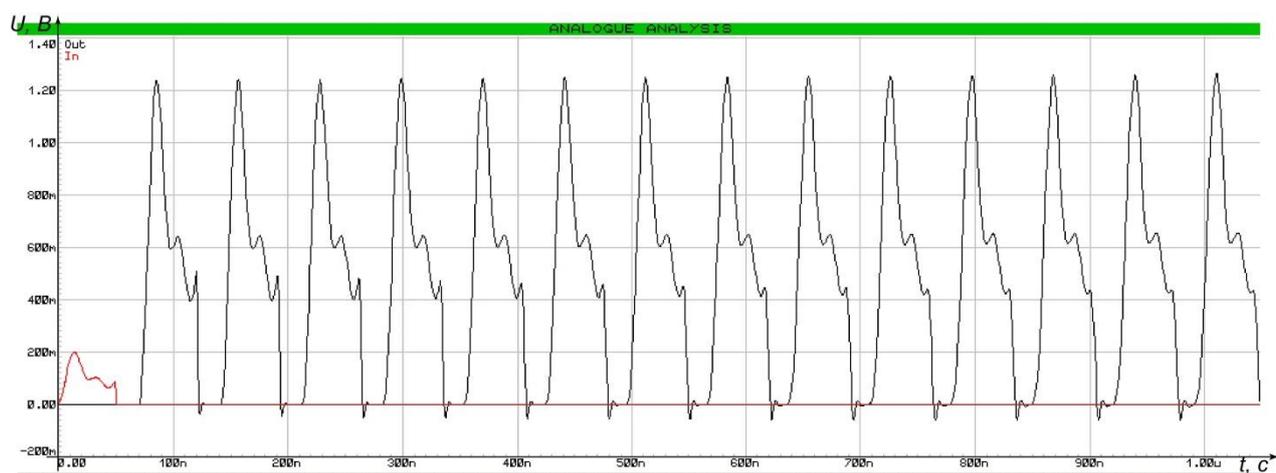


Рис. 7. Временной анализ функционирования макета системы радиоимпульсной регенерации на элементах быстродействующей полупроводниковой электроники среде Proteus.

Как видно из данного рисунка, исходный одиночный СКИ длительностью

$\Delta T1 = 50$  нс (максимальный размах 200 мВ), усиливается, многократно повторяется, но постепенно вырождается, ограничивая количество операций циклогенерации.

Для оценки качества восстановления исходного СКИ, необходимо вычислить взаимную корреляцию  $r$  исходного и восстановленного радиоимпульсов [14]:

$$r = \frac{\sum \left( Y_{1,i} - \bar{Y}_1 \right) \cdot \left( Y_{2,i} - \bar{Y}_2 \right)}{\sqrt{\sum \left( Y_{1,i} - \bar{Y}_1 \right)^2 \cdot \sum \left( Y_{2,i} - \bar{Y}_2 \right)^2}},$$

где  $Y_1 = \frac{U}{U_M}$  – выборки значений исходного сигнала,  $Y_2 = \frac{U_B}{U_{MB}}$  – выборки значений восстановленного сигнала,  $\bar{Y}_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{1,i}$ ,  $\bar{Y}_2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{2,i}$  – средние значения выборок,  $M$  – количество выборок.

Восстановление СКИ проводится посредством модели СФД в графической среде имитационного моделирования Simulink с последующим корреляционным анализом исходного и восстановленного радиоимпульса (рис. 8).

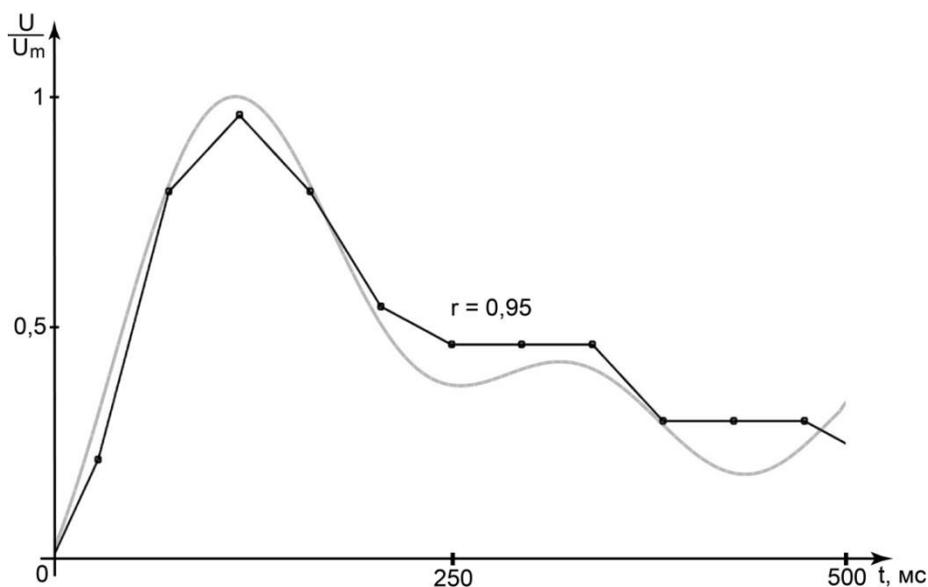


Рис. 8. Временной профиль восстановленного СКИ.

## Заключение

Таким образом, созданная модель системы радиоимпульсной регенерации подтвердила эффективность разработанного метода циклогенеративного преобразования, а также возможность восстановления сложного нестационарного СКИ-сигнала по одному радиоимпульсу. Одновременно с этим зацикленный СКИ-сигнал претерпевает искажения от импульса к импульсу в заданном циклопериоде их следования, и в условиях расширения полосы до 1...3 ГГц циклогенеративная система на элементах быстродействующей полупроводниковой электроники будет малоэффективна ввиду значительных затуханий на ЛЗ, искажений, взаимных наводок между самими элементами и их соединениями. Однако данные недостатки несколько не снижают преимущества метода циклогенерации в целом, поскольку все указанные выше ограничения практически полностью компенсируются переходом от классической полупроводниковой электроники к оптоэлектронике путем замены полупроводниковых узлов циклогенеративной системы на их радиофотонные аналоги, открывая новые перспективы для дальнейших научных исследований.

## Литература

1. Кольцов Ю.В. Методы и средства анализа и формирования сверхкороткоимпульсных сигналов. Монография. – М.: Радиотехника, 2004. – 128 с.
2. Patrick T. Callahan, Michael L. Dennis, and Thomas R. Clark Jr. Photonic Analog-to-Digital Conversion. // Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol. 30, №4, 2012, p. 280-286.
3. Будагян И.Ф., Костин М.С., Шильцин А.В. Строб-фрейм-дискретизация радиоимпульсов субнаносекундного диапазона. // Радиотехника и электроника, 2017, Т.62, № 5, с. 486-492.

4. Авиационные системы радиовидения. (Научная серия «Бортовые аэронавигационные системы»). Монография. Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2015. – 648 с.
5. Костин М.С., Бойков К.А. Циклогенеративные системы высокоскоростной оцифровки нестационарных субнаносекундных процессов. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2017. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/8/text.pdf>. Дата доступа: 13.03.2018 г.
6. Костин М.С., Бойков К.А. Циклогенеративные системы атактовой оцифровки субнаносекундных радиоимпульсов в радиовидении. // Инженерная физика, 2018. – №1. – с. 41-47.
7. 1,5 GHz, Ultrahigh Speed Op Amp AD8000 [электронный ресурс]. Data Sheet. Сайт компании Analog Devices Inc. Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8000.pdf>. Дата доступа: 13.03.2018 г.
8. GaAs MMIC SOT26 SPDT SWITCH, DC-3 GHz HMC197BE. Data Sheet [электронный ресурс]. Сайт компании Analog Devices Inc. Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc197b.pdf>. Дата доступа: 13.03.2018 г.
9. Коаксиальные кабели [электронный ресурс]. Сайт группы ISC Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc04.pdf>. Дата доступа: 13.03.2018 г.
10. Коаксиальные кабели [электронный ресурс]. Сайт группы ISC. Режим доступа: [https://www.icsgroup.ru/upload/iblock/15a/M\\_coax.pdf](https://www.icsgroup.ru/upload/iblock/15a/M_coax.pdf). Дата доступа: 13.03.2018 г.
11. Oljasa M, Surtihadi H. Operational amplifier gain stability, Part 1: General system analysis. // Analog Applications Journal, 2010, 1Q, pp. 20-23.
12. Gray P.R., Hurst P.J., Lewis S.H., Meyer R.G. Analysis and design of analog integrated circuits. – 5th ed., 2009. – 881 p.

13. Altair Engineering Support Contact Information. Examples Guide for FEKO 14.0 – HyperWorks, [Электронный ресурс]. Сайт компании Altair Engineering Inc. 2015, 233 стр.
14. Бараз В.Р., В.Ф. Пегашкин. Использование MS Excel для анализа статистических данных: учеб. пособие / М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). – 2-е изд., перераб. и доп. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 181 с.

**Для цитирования:**

К. А. Бойков. Разработка и исследование системы радиоимпульсной регенерации для устройств высокоскоростной стробоскопической оцифровки. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/6/text.pdf>